

# VI CONGRESO IBÉRICO de AgroIngeniería

5 a 7 de Septiembre | 2011  
Universidade de Évora | Portugal



## Empleo de morteros de cemento ecoeficientes en las explotaciones agropecuarias

J. Massana<sup>1</sup>, A. Guerrero<sup>2</sup>, R. Antón<sup>3</sup>, E. Sánchez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GI Instalaciones Agro-ganaderas y Medio Ambiente. EUIT Agrícola. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid, España. [jordi.massana@upm.es](mailto:jordi.massana@upm.es), [elvira.sanchez.espinosa@upm.es](mailto:elvira.sanchez.espinosa@upm.es)

<sup>2</sup> Instituto Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja". Consejo Superior de Investigaciones Científicas C/ Serrano Galvache 4, 28033 Madrid, España. [aguerrero@ietcc.csic.es](mailto:aguerrero@ietcc.csic.es)

<sup>3</sup> GI Tecnología de la Construcción y Ciencia de los Materiales. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid, España.

### Resumen

En los ambientes agrícola-ganaderos, como las explotaciones de ganado porcino, la gran producción de purín, que puede ocasionar importantes deterioros, particularmente en suelos, comederos y estructuras de almacenamiento de este subproducto. El objetivo principal de este trabajo es estudiar, en una balsa experimental de purín, procedente de una explotación integral, la durabilidad de dos morteros de cemento: un portland resistente a sulfatos y otro en el que se ha sustituido un 16% de portland por ceniza volante, ambos pertenecientes a la clase resistente 42,5. El ensayo se ha realizado durante un tiempo prolongado de 60 meses, en los que los morteros han estado sumergidos permanente en purín de cerdo, con disponibilidad de oxígeno (ambiente aerobio) y CO<sub>2</sub>. Se evalúa el comportamiento resistente y los cambios en la microestructura.

Los resultados de este trabajo muestran que el mortero de CEM I tiene una porosidad total significativamente mayor, por lo que es un material más susceptible a la degradación. Se recomienda, para ambientes agrícola-ganaderos, el uso de cementos con cenizas en baja proporción, ya que ofrecen excelentes prestaciones resistentes y un buen comportamiento durable, además de obtenerse a menores costes y caracterizarse por su mayor sostenibilidad.

**Palabras Clave:** Instalaciones ganaderas, purín de cerdo, morteros, cenizas volantes, durabilidad.

### Abstract

In agricultural-livestock environments, such as pig farms, a large production of manure can cause considerable damage, particularly in soils and in storage structures of this product. The main objective of this work is to study, in an experimental pond of liquid manure from an integral farm, the durability of two cement mortars: a sulphate-resistant Portland cement and a Portland cement with 16% contains of fly ash. Both cements are of strength class 42.5. The test was carried out for an extended period of 60 months, in which mortars have been permanently submerged in pig slurry with oxygen availability (aerobic atmosphere) and CO<sub>2</sub>. Resistance behavior and changes in the microstructure are evaluated.

The results of this study show no significant differences between compressive strength of cement mortars tested. However, the mortar CEM I is a total porosity significantly higher, making it a material more susceptible to degradation. The use of cement with low ash proportion is recommended for agricultural-livestock environments, since they offer excellent resistance and durable performance, lower costs and greater sustainability.

**Keywords:** Livestock facilities, pig slurry, mortar, fly ash, durability.

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la ganadería intensiva ha provocado un rápido crecimiento de la producción en el sector porcino español, que ha modificado sus características productivas, sanitarias, económicas y medioambientales. Por sus características zootécnicas (tanto fisiológicas, patológicas, nutricionales, de manejo, etc.), la porcinocultura ha alcanzado el mayor grado de industrialización y de intensificación productiva, del sector ganadero. Este hecho se pone de manifiesto por el continuo incremento del censo, acompañado del incremento del tamaño de las explotaciones, pero a costa de un menor número de las mismas.

En estas condiciones se rompe el binomio agricultura-ganadería de las explotaciones tradicionales, que ha originado un aumento de la problemática medioambiental, relacionados con la acumulación y gestión de los grandes volúmenes de estiércoles y purines producidos.

Las infraestructuras de almacenamiento del purín son generalmente fosas o balsas. En el primer caso, son depósitos de paredes verticales, contruidos in situ con hormigón armado, o con fábrica de ladrillo o bloques revestidos de mortero de cemento, o también pueden emplearse elementos prefabricados.

La presencia de prefabricados de hormigón es cada vez más frecuente en las explotaciones tanto en los elementos estructurales como en los cerramientos y divisiones interiores y especialmente en los suelos enrejillados.

Estos elementos constructivos entran en contacto, de forma permanente o discontinua, con el purín, además de con restos de productos de alimentación y aguas de limpieza, a los que hay que añadir el efecto de la abrasión producida por los animales. Todo ello puede provocar la degradación de estos elementos con las consecuentes pérdidas económicas en las explotaciones que eso conlleva.

En la Instrucción española del hormigón estructural EHE [1] se recogen las estrategias de durabilidad para morteros y hormigones, especificando la necesidad de elección de materias primas adecuadas a la clases de exposición a las que se encuentran sometidas a lo largo de su vida útil. Dentro de estas clases no se contemplan, como clases de especial agresividad, los ambientes ganaderos, aunque algunos datos experimentales muestran un deterioro superficial sistemático provocado por los componentes químicos de carácter ácido presentes en el purín [2]. La necesidad de conocer el comportamiento de los morteros y hormigones, más frecuentemente usados en estos ambientes, así como determinar el cemento más adecuado para su uso en los mismos, justifica este trabajo.

En términos generales el purín de cerdo es un material acuoso, complejo y variable en su composición, con un contenido muy bajo de materia seca (90% de agua), con presencia de ácidos orgánicos, acético y butírico principalmente, y distintas sales sulfhídricas procedentes de la urea [3, 4]. Su variabilidad está influida por factores relacionados con la gestión de la explotación y con las características de los animales: edad, raza, estado fisiológico,...etc [5].

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el comportamiento de dos tipos de cementos ambos de clase resistente 42,5. Por un lado un cemento portland resistente a sulfatos y por otro un cemento en el que se ha sustituido un 16% de portland por ceniza volante, que debe ser considerado como un cemento ecoeficiente o más sostenible que el cemento portland normal. Para ello se han sumergiendo probetas de mortero en una balsa experimental de purín,

durante un periodo de cinco años y se ha estudiado el comportamiento mecánico-resistente y los posibles cambios en la microestructura, mediante porosimetría por intrusión de mercurio y difracción de rayos X.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### a. Cementos

Se han utilizado dos tipos de cementos: un cemento portland resistente a sulfatos CEM-I SR 42,5N (CEM I), recomendado para la elaboración de elementos prefabricados sometidos a la presencia de sulfatos, y un cemento portland con adición de cenizas volantes CEM II/A-V 42,5R (CEM IIA). Para este último cemento el contenido en cenizas volantes está en el rango del 6-20%, de acuerdo a la Norma UNE-EN 197-1:2000 [6]. La composición química de ambos cementos se encuentra recogida en la Tabla 1.

*Tabla 1. Composición química de los cementos (% en peso)*

Cemento	Composición Química									
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	Na <sub>2</sub> O	LL.
<b>CEM I</b>	64,4	19,1	3,9	4,7	1,3	0,7	3,1	-	0,2	2,1
<b>CEM IIA</b>	48,21	35,35	5,67	3,6	1,74	1,35	2,23	0,008	-	1,78

### b. Medio agresivo: Purín

El purín de la balsa experimental en la que se colocaron las probetas procede de una explotación integral de porcino del término municipal de Etreros (Segovia, España). La balsa experimental tiene una profundidad de 1 metro, lo que asegura cierta disponibilidad de oxígeno (ambiente aerobio) y CO<sub>2</sub>.

La composición del purín depende de muchos factores, pero principalmente del tipo de animal, de la fase fisiológica y productiva, de las características de la alimentación y del manejo en la explotación. Como consecuencia de esta variabilidad de factores implicados la composición del purín varía a lo largo del tiempo.

Durante los primeros tres años de experimentación, cada 3 o 6 meses, se han realizado muestreos del purín. Los valores medios y extremos de su composición son los que muestra la Tabla 2. De los valores de la tabla, cabe destacar que el pH oscila entre 7,4 y 8,2, pudiendo considerarse como un agente agresivo frente al cemento que tiene un pH entorno a 12,5 [7]. En este intervalo, y de acuerdo a la Instrucción española del hormigón EHE [1], el purín debe considerarse como un medio de agresividad muy débil.

El pH se mantiene en valores relativamente altos, a pesar de la concentración de ácidos como el acético y el propiónico, gracias al par ácido/base NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NH<sub>3</sub>. La concentración de nitrógeno amoniacal es muy alta, entre 500 y 1200 mg/l, procedente de la hidrólisis del nitrógeno orgánico, que en condiciones anaerobias produce formas amoniacaes. Por esta concentración y de acuerdo a la mencionada EHE debe considerarse como un medio de agresividad muy fuerte. Es destacable también la presencia de iones cloruro, que producen una salinidad similar a la del agua de mar.

**Tabla 2.** Valores máximos, mínimos y medios del purín

Componente		Mínimo	Medio	Máximo
<b>pH</b>		7,43	7,94	8,20
<b>Conductividad (mS)</b>		5,68	8,92	13,25
<b>Potencial redox (mV)</b>		-304,00	-169,38	-71,00
<b>Sólidos totales (mg/l)</b>		4,07	5,87	7,19
<b>Sólidos fijos (mg/l)</b>		1,90	2,91	3,50
<b>Sólidos volátiles (mg/l)</b>		2,04	2,95	3,98
<b>Nitrógeno total (%)</b>		0,06	0,12	0,20
<b>Nitrógeno amoniacal (%)</b>		0,05	0,09	0,12
<b>Sulfuros (mg/l)</b>		5,36	71,32	105,00
<b>Bicarbonatos (mg/l)</b>		3,38	5,68	10,55
<b>Aniones</b>	<b>Sulfatos (mg/l)</b>	0,00	4,51	9,70
	<b>Cloruros (mg/l)</b>	61,00	453,04	1388,00
<b>Ácidos grasos</b>	<b>Acético (mg/l)</b>	32,55	153,79	286,70
	<b>Propiónico (mg/l)</b>	0,00	40,96	124,60
	<b>Isovalérico (mg/l)</b>	0,00	2,15	3,50

A la vista de estos datos, podemos anticipar la dificultad para definir el tipo de agresividad del purín ante los morteros u hormigones.

### c. Proceso experimental

Se han elaborado un total de 54 probetas normalizadas (40x40x160 mm), 27 por cada tipo de cemento, con una relación agua/cemento de 0,5 y una relación arena/cemento 3/1, de acuerdo a la Norma Europea EN 196-1:1996 [8]. Las probetas, una vez fabricadas, se desmoldaron a las 24 horas y fueron curadas en agua durante 28 días a 22±2°C. Finalizado el curado, tres probetas de cada cemento se caracterizaron mecánicamente (resistencia a flexión y compresión) y una cuarta probeta se utilizó para la caracterización microestructural. El resto de probetas curadas fueron sumergidas en la balsa de purín experimental a 1 m de profundidad.

A los 3, 6, 12, 24, 36, 48 y 60 meses de exposición al purín, las probetas se extrajeron de la balsa experimental. Antes de su caracterización, y después del lavado con agua, se mantuvieron sumergidas 48 horas en agua, para conseguir su estabilización.

Se han empleado tres probetas para la caracterización mecánica, determinándose la resistencia a flexión y compresión de acuerdo a las prescripciones de la norma EN 196-1:1996 [8]. Con los datos de la resistencia a compresión se realiza un análisis de la varianza, mediante el programa StatGraphics v.5 (2000), considerando como variable dependiente la resistencia a compresión y como factores el cemento, el tiempo y su interacción.

La cuarta probeta, no sometida a carga mecánica, se ha utilizado para la caracterización microestructural. Dicha caracterización ha consistido en el estudio de fases cristalinas mediante difracción de rayos X (DRX), y en el estudio de la porosidad total del material y de la distribución de tamaño de poros, mediante porosimetría por intrusión de mercurio (PIM). En ambos casos se ha trabajado con muestras obtenidas de la parte exterior de las rebanadas de las probetas, que es la zona que está más próxima al medio agresivo.

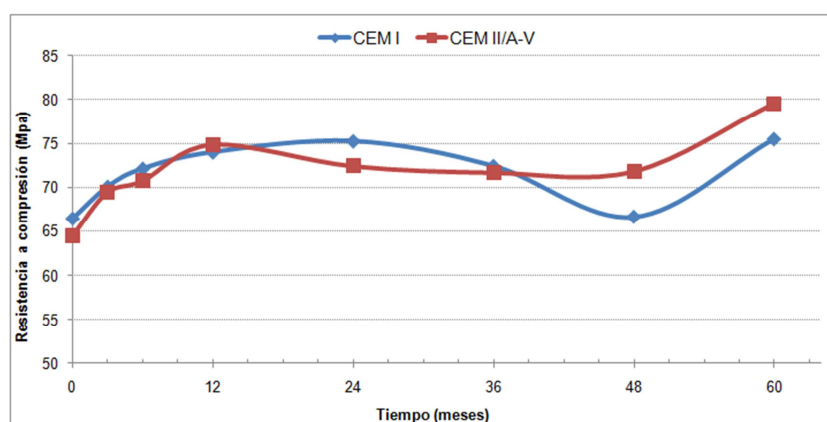
El ensayo de porosimetría se ha llevado a cabo con un equipo Micromeritics, modelo Autopore IV 9500, con muestras de aproximadamente  $3 \pm 0.01$  g estabilizadas a 40°C hasta peso constante. La estructura porosa queda definida por el tamaño de sus poros, y para ello se ha adaptado la clasificación de Mindess [9]. Se establecen 4 rangos de tamaño de poro: macroporos ( $\varnothing > 10 \mu\text{m}$ ), capilares grandes ( $50 \text{ nm} < \varnothing < 10 \mu\text{m}$ ), capilares medianos ( $10 \text{ nm} < \varnothing < 50 \text{ nm}$ ) y capilares pequeños ( $5 \text{ nm} < \varnothing < 10 \text{ nm}$ ). Con esta división de los tamaños de poro se han elaborado diagramas de evolución de la distribución porosa a los distintos tiempos de exposición [10].

Los análisis de difracción de rayos X han sido realizados en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas con un equipo Broker D8 Advance, sobre muestra molida en molino de ágata automático de la marca Retsch, modelo RM 200, consiguiendo tamaños de muestras inferiores a 0,063 mm. Para el posterior proceso de identificación de las fases, se empleó un software de tratamiento de los difractogramas y las bases de datos cristalográficas del ICDD (International Centre for Diffraction Data).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### a. Resistencias mecánicas

La evolución de la resistencia mecánica de las probetas de mortero con el tiempo de exposición en el medio purín, se recogen en la Figura 1. La Tabla 3 muestra los valores medios por mínimos cuadrados de los resultados de los ensayos de compresión.



*Figura 1. Evolución de la resistencia a compresión*

Los valores medios resistentes (71,58 MPa para CEM I y 71,86 MPa para CEM II/A) son altos y prácticamente iguales, no existiendo diferencias significativas entre ambos.

*Tabla 3. Medias por mínimos cuadrados para la Resistencia a compresión.*

Nivel		Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media total		39	71,72			
Cemento	CEM I	20	71,58 <sup>a</sup>	0,26	71,04	72,12
	CEM II/A-V	19	71,86 <sup>a</sup>	0,27	71,31	72,41

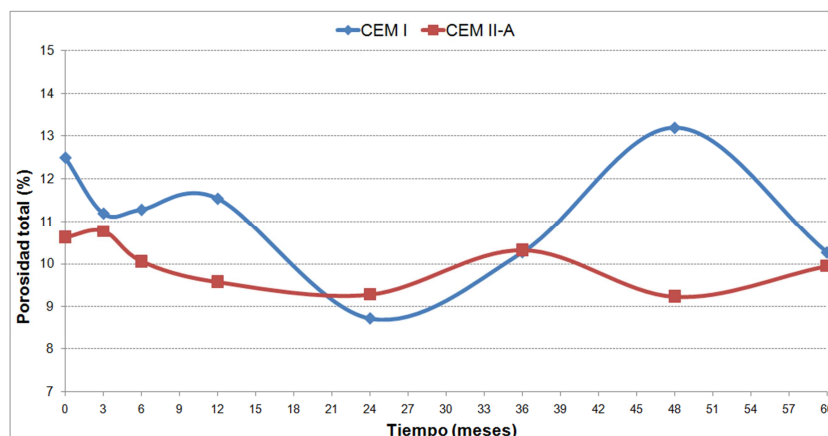
Las diferencias en el comportamiento resistente durante los primeros 36 meses son mínimas, en clara discordancia con algunos trabajos en los que se indica que la presencia de cenizas puede retrasar la adquisición de resistencia inicial.

En el caso del cemento CEM I el valor máximo se alcanza a los 24 meses después de un incremento continuo desde el momento inicial. Este incremento también se manifiesta en el mortero de CEM II-A, durante los primeros 12 meses, pero la máxima resistencia se alcanza a los 60 meses, con un incremento del 30% del valor inicial, después de unos valores sostenidos entre los 12 y los 48 meses.

Este máximo crecimiento experimentado por el mortero de CEM II-A coincide con los trabajos de Molina [11] en los que el coeficiente de eficiencia de las cenizas es mayor cuando el contenido de las mismas se encuentra alrededor del 15%.

### **b. Porosimetría por Intrusión de Mercurio (PIM)**

Las variaciones en la resistencia a compresión van acompañadas de variaciones en la porosidad total, como muestra la figura 2:

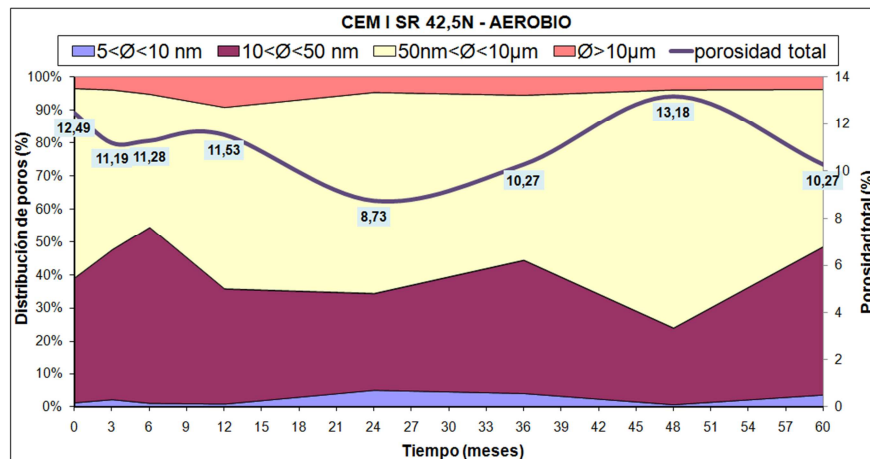


*Figura 2. Evolución de la porosidad total*

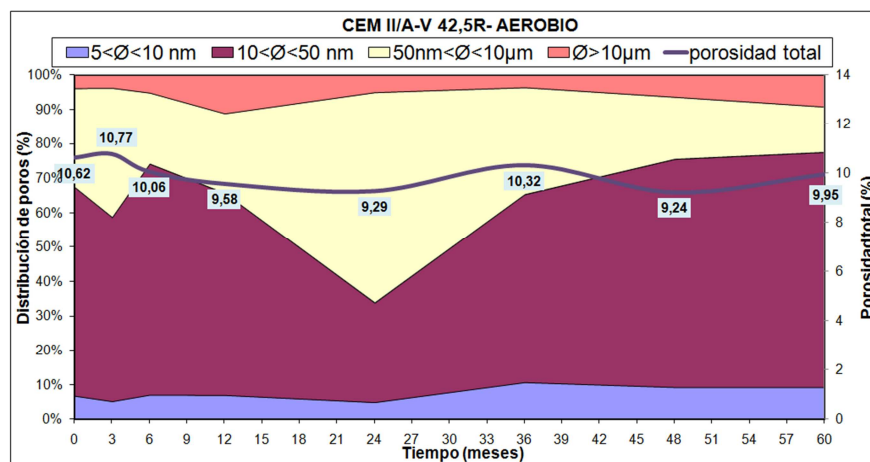
En general los valores de la porosidad total son coherentes con los obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión, especialmente hasta los 24 meses. En el caso del mortero de cemento CEM I la porosidad total disminuye en los primeros 24 meses al tiempo que se incrementa la resistencia en ese periodo. La máxima porosidad a los 48 meses coincide con su mínima resistencia.

En el caso del mortero de CEM II-A esta relación directa se manifiesta hasta los 24 meses. A partir de ese momento hay situaciones en las que un aumento de la resistencia no se corresponde con una disminución de la porosidad. Así el incremento de las resistencias desde los 24 hasta los 60 meses no se refleja en una disminución significativa de la porosidad total.

Esta falta de relación entre la variación de la resistencia y la de la porosidad total, es un indicio de que hay otros parámetros que intervienen en el establecimiento de relaciones entre ambas variables. Uno de estos parámetros puede ser la distribución porosa, cuya evolución recogen las figuras 3 y 4 para los morteros de cemento CEM I y CEM II-A respectivamente [10].



**Figura 3.** Evolución de la distribución de tamaño de poros en CEM I



**Figura 4.** Evolución de la distribución de tamaño de poros en CEM II-A

En el mortero de cemento CEM I se observa un alto porcentaje de capilares grandes ( $\text{Ø} > 50 \text{ nm}$ ) a lo largo de todo el ensayo. Así mismo se observa una baja proporción de capilares pequeños ( $\text{Ø} < 10 \text{ nm}$ ), a lo largo del tiempo, hecho que está relacionado con la cantidad de gel de este mortero.

En el mortero de cemento CEM II-A, los cambios en la distribución porosa son más acusados (Figura 4). El cambio más significativo se muestra a los 24 meses, con una disminución significativa de la proporción de capilares medianos y pequeños (poros con  $\text{Ø} < 50 \text{ nm}$ ), que queda reducida al 30% de la porosidad total, y un aumento de los capilares grandes ( $50 < \text{Ø} < 10000 \text{ nm}$ ). A partir de ese momento se observa una reducción en la proporción de capilares grandes ( $\text{Ø} > 50 \text{ nm}$ ) y un incremento de los poros de tamaño menor de 50 nm. A partir de los 36 meses y hasta la finalización del ensayo se observa un nuevo refinamiento de la distribución porosa, llegando a tener una cantidad de poros con diámetro inferior a los 50 nm que representa el 78% de la porosidad total.

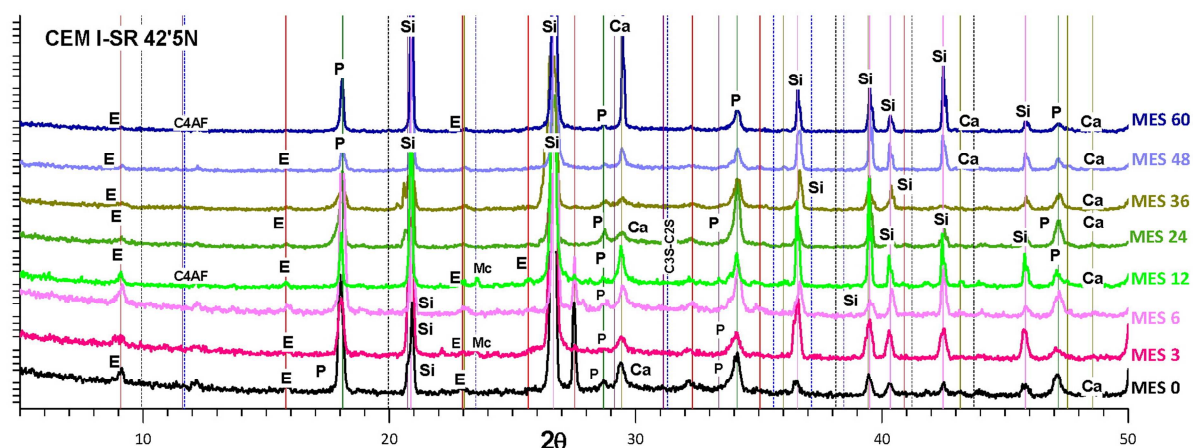
Este refinamiento de la porosidad puede deberse a las reacciones puzolánicas diferidas en el tiempo, propias de la presencia de cenizas volantes [10, 11, 12] que se superponen y anulan al efecto agresivo del purín.



### c. Difracción de rayos X (DRX)

Las principales diferencias en la evolución de las fases cristalinas formadas, aparecen a partir de los 24 meses y se mantiene hasta los 60 meses. Esta evolución, a lo largo del periodo de estudio, puede apreciarse en las figuras 5 y 6 que recogen los difractogramas de los morteros de CEM I y CEM II-A, respectivamente [10].

En el mortero de CEM I, se observa una pérdida de intensidad en los picos del difractograma (Figura 5) desde primeras edades hasta los 24 meses, lo que supone la disolución de las fases principales; portlandita, etringita y calcita. Este hecho tiene como consecuencia un incremento de la porosidad total del material, que llega a ser del 13,2% a los 48 meses.



*Figura 5. Evolución de los difractogramas del CEM I en el periodo 24-60 meses*

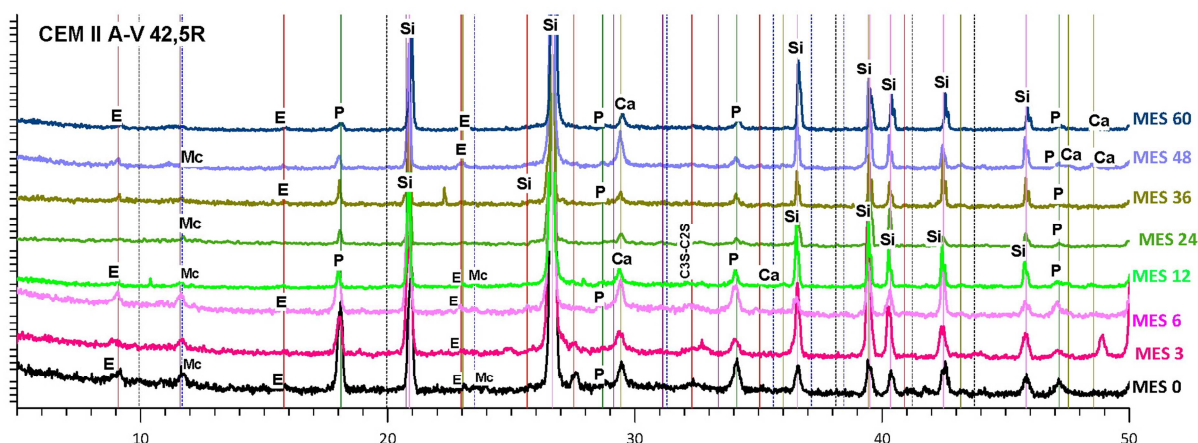
Este aumento de la porosidad va acompañado de un incremento de la proporción de capilares grandes, que favorece la entrada, entre otros, del  $\text{CO}_2$  disuelto en el medio, procedente de las reacciones de fermentación de los compuestos orgánicos del purín. La cantidad de  $\text{CO}_2$  presente en el purín, la disponibilidad de iones calcio procedentes del proceso de lixiviación de la portlandita y la gran proporción de capilares grandes, permiten una buena cristalización de carbonato de calcio o calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) a partir de los 48 meses de inmersión. Este fenómeno se reflejaría en el difractograma correspondiente a los 60 meses, con un pico de gran intensidad de la calcita ( $2\theta=29,43^\circ$ ). Así mismo a los 60 meses, se detecta en el difractograma un incremento de intensidad del pico secundario de la portlandita ( $2\theta=18,10^\circ$ ).

La precipitación de la calcita en los poros grandes, produce un refinamiento de la estructura del mortero de cemento CEM I a los 60 meses, con una reducción de la porosidad total, del 13,2% al 10,3%, y un incremento de la resistencia a compresión de, aproximadamente, el 14%. La reducción de la porosidad, asociada al incremento de calcita, confirma la formación de la capa protectora enunciada por otros autores [12, 13, 14], ya que con los valores en los que se mueve el pH del purín (7-8) la calcita es insoluble y por tanto impide o ralentiza la penetración, en la red porosa, de los agentes agresivos que posea el purín.

En el mortero de cemento CEM II-A los cambios mostrados a los 24 meses en la distribución porosa están relacionados con la disolución de fases como la portlandita y la



etringita, cuyas reflexiones prácticamente desaparecen a los 24 meses, como se aprecia en el difractograma de rayos X (Figura 6).



*Figura 6. Evolución de los difractogramas del CEM II-A en el periodo 24-60 meses*

El refinamiento de la distribución porosa que se aprecia desde los 36 meses puede ser debido a la difusión de iones sulfato del medio purín, que puede provocar la reprecipitación de fases como la etringita, como se aprecia en los difractogramas de rayos X a 48 y 60 meses (Figura 6), y a una mayor cantidad de poros de gel ( $\varnothing < 10$  nm), que pasan de representar el 4,5% al 10%, de la porosidad total (Figura 4).

#### 4. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos podemos concluir lo siguiente:

- El efecto del purín produce una disminución significativa de la porosidad total en el cemento con cenizas volantes (CEM II-A) mientras que, en cambio, provoca un aumento de la porosidad en el mortero de cemento portland (CEM I). Como consecuencia el posible efecto agresivo del purín se ve anulado por las reacciones puzolánicas que se desarrollan en este medio acuosos por la presencia de las cenizas volantes.
- El comportamiento resistente del mortero de cemento CEM I se ha mostrado sensiblemente inferior que el de CEM II-A, además su porosidad total y su proporción de capilares grandes y macroporos es significativamente mayor, lo que lo convierte en un material más susceptible a la degradación.
- Se recomienda, para ambientes agrícola-ganaderos, el uso de cementos con cenizas en baja proporción, ya que ofrecen excelentes prestaciones resistentes y un buen comportamiento durable, además de obtenerse a menores costes y caracterizarse por su mayor sostenibilidad por el aprovechamiento de subproductos industriales como son las cenizas volantes.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto BIA 2009-14395-C04-04) por el soporte financiero de este trabajo. Así mismo, agradecen la colaboración prestada por el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

## 6. BIBLIOGRAFÍA

1. MOPU. (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural*. EHE, Ministerio de Fomento, Madrid, España.
2. De Belie, N.; Lenehan, J.J.; Braam, CR.; Svennerstedt, B.; Richardson, M.; Snock, B. (2000). *Durability of building materials and components in the agricultural environment, Part III: Concrete structures*. Journal of Agricultural Engineering Research 76 (1): 3-16.
3. Sánchez, M.; González, J.L. (2005). *The fertilizer value of pig slurry. I: Values depending on the type of operation*. Bioresour Technology 96: 117-193.
4. Sánchez, E.; Massana, J.; Garcimartín, M.A.; Moragues, A. (2008). *Mechanical strength and microstructure evolution of fly ash cement mortar submerged in pig slurry*. Cement and Concrete Research 38: 717-724.
5. Moral, R.; Moreno-Caselles, J.; Pérez-Murcia, M.; Pérez-Espinosa, A.; Rufete, B.; Paredes, C. (2005). *Characterization of the organic matter pool in manures*. Bioresour Technology 96, 153-158.
6. UNE-EN 197-1:2000. (2000). *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*. AENOR. España.
7. Fernández Cánovas, M. (2007). *Hormigón*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. España.
8. UNE-EN 196-1:1996. (1996). *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencia mecánicas*. AENOR. España.
9. Mindess, S.; Young, J.F.; Darwin, D. (2003). "*Concrete*". Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458. 2nd Edition. (2002).
10. Massana Guitart, J. (2011). "*Durabilidad de morteros de cemento en contacto con purines de cerdo*". Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. España.
11. Molina Bas, O.I. (2008). "*La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigón*". Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. España.
12. Gaztañaga, M.T. (1996). "*Influencia de la carbonatación en la microestructura de diferentes pastas de cemento hidratadas*". Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España.
13. Bertron, A; Duchesne, J.; Escadeillas, G. (2005). *Attack of cement pastes exposed to organic acids in manure*. Cement and Concrete Composites 27: 898-909.
14. Llorente, I. (2008). "*Degradación de hormigones de altas y ultra altas prestaciones por aguas naturales: Análisis en función de diferentes escenarios de lixiviación*". Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España.